

## FRP 보강판 부착 콘크리트에서 유도초음파 모드 거동에 대한 접착층의 영향

### Effect of Bonding Layer on Guided Wave Mode Behavior in FRP Plate Bonded on Concrete

이용주\*, 신성우\*<sup>†</sup>

Yongju Lee\* and Sung Woo Shin\*<sup>†</sup>

**초 록** 본 연구에서는 FRP 보강판 부착 콘크리트에서의 유도초음파 기본 모드의 전파 특성에 부착제인 epoxy의 두께와 물성이 미치는 영향을 알아보려고 하였으며, 이를 위해 FRP-epoxy-concrete로 구성된 다층 유도초음파 시스템을 모델링하고 모드 해석을 수행하였다. Epoxy 층의 두께와 탄성계수를 변수로 하여 해석을 수행한 결과, A0 모드에 비해 S0 모드가 epoxy 층의 두께와 탄성계수 변화에 큰 영향을 받으며, 이로부터 경계층인 Epoxy 층의 상태 평가에는 A0 모드에 비해 S0 모드가 유효하리라는 결론을 얻었다.

**주요용어:** 유도초음파, FRP 보강판 부착 상태 진단, 모드 분산 해석, 접착층 상태

**Abstract** In this study, effects of bonding agent, e.g. epoxy, on the behavior of fundamental guided wave modes propagated in FRP plate bonded on a concrete, are investigated. Global matrix model of multilayered FRP-epoxy-concrete system was constructed to obtain the velocity and attenuation dispersion curves of the fundamental A0 and S0 modes. Two variables, thickness and elastic modulus of epoxy layer, were considered in the dispersion analysis. It was found that both the thickness and the elastic modulus of epoxy layer greatly affect the phase velocity and attenuation of S0 mode while those are negligible for A0 mode. Based on the results, it was concluded that S0 mode is more effective than A0 mode for bonding condition assessment for FRP plate bonded concrete.

**Keywords:** Guided Waves, NDE of FRP Plate Bonding Condition, Mode Dispersion Analysis, Bonding Condition

#### 1. 서 론

콘크리트 구조물은 공용 기간 동안 역학적/환경적 요인 등에 의하여 다양한 손상과 열화가 발생하며, 이러한 손상과 열화는 콘크리트 구조물의 성능 저하를 야기하여 경우에 따라서는 구조물의 급작스런 붕괴를 유발할 수 있다. 따라서 이러한 손상과 열화에 대한 적절한 보수/보강을

실시하는 것은 시설 콘크리트 구조물의 사용성과 안전성 확보에 있어서 매우 중요한 문제이다.

콘크리트 구조 부재의 종류에 따라 다양한 보수/보강 공법이 제시되었으며, 특히 바닥판이나 보와 같은 휨 부재의 모멘트 저항 성능에 대한 보강 공법으로 보강판 부착 공법이 많이 사용된다. 보강판 부착 공법은 강판이나 FRP 판과 같은 보강판을 휨 부재의 바닥 면에 고강도 접착제 등

[접수일: 2012. 1. 5, 수정일: 2012. 2. 9, 게재확정일: 2012. 2. 10] \*부경대학교 공과대학 안전공학과, <sup>†</sup>Corresponding Author: Department of Safety Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea (E-mail: shinsw@pknu.ac.kr)

을 이용하여 부착 보강하는 방식이며, 특히 강판에 비해 FRP 보강판은 대기에 노출되더라도 부식이 발생할 우려가 없어서 외부 환경에 노출된 콘크리트 휨 부재의 보강에 주로 사용된다 [1]. 한편, FRP 보강판 부착 공법에 의한 콘크리트 구조물의 보강 성능은 FRP 보강판과 콘크리트의 부착 계면 상태에 매우 의존적이기 때문에 보강판의 들뜸과 같은 부착 불량 구간이 존재하거나, 부착 강도가 약할 경우 적절한 보강 성능을 기대하기 어렵다[2]. 따라서 FRP 보강판 부착 공법의 효과적인 적용을 위해서는 FRP 보강판과 콘크리트의 부착 상태에 대한 평가가 반드시 실시되어야 한다.

보강판과 콘크리트의 부착 상태를 비파괴적으로 검사하는 방법으로 전자기파에 기반을 둔 비파괴검사 기법이 기존에 제안되었으나 [3,4], 전자기파 기반 기법의 경우 측정 장비가 매우 고가이고, 한번에 검사할 수 있는 영역이 매우 좁아서 경제성이나 검사의 효율성이 낮아 실무에서 보편적으로 사용하기 어려운 문제점이 있다. 이에 따라 전자기파 기반 기법을 실무적으로 대체할 수 있는 다양한 비파괴검사 기법에 대한 연구가 이루어지고 있으며, 그 중에서도 넓은 영역을 한번에 검사할 수 있어서 검사의 효율성이 우수한 것으로 알려진 유도초음파기법이 보강판 부착 상태 평가 기술로써 많이 검토되고 있다. Castaings 등 [5]은 부착 불량 구간의 크기가 유도초음파의 전파 속도에 미치는 영향에 대한 실험적 연구를 수행하여, 부착 불량 구간의 탐지에 특정 유도초음파 모드의 전파 속도를 이용하는 방법을 제안하였으며, Luangvilai 등[6]은 부착 불량 구간의 존재에 따른 유도초음파 모드 변환 특성에 대한 실험적 연구를 수행하여, 이로부터 모드 변환을 부착 불량 구간 탐지에 적용할 것을 제안하였다. 마지막으로 Kim 등[7]은 유도초음파 기반 부착손상 탐지에 시간 반전(time-reversal)기법의 적용 가능성을 실험적으로 알아보았다. 이외에도 부착 상태 평가에 유도초음파를 적용하고자 하는 다양한 연구들이 있으나 대부분 부착 상태에 따른 유도초음파의 거동을 실험적으로 파악하는 내용이며, 보강판이 부착된 콘크리트에서의 유도초음파 거동 특성에 대한 해석적인 연구가 부족한 실정이다. 특히, 보강판이 부착된 콘크리트에서의 유도초음파 거동 특성에 대한 해석적인 연구에서는

대부분 보강판과 콘크리트만을 모델링하고 부착 계면층인 epoxy 층을 무시하여 해석하는 경우가 많으나, 실제 시공 과정에서 epoxy의 도포 두께는 FRP 두께와 비교하였을 때 무시할 수 없을 정도로 크므로 epoxy 층에 대한 영향을 반드시 고려하여야 한다.

본 논문에서는 보강판 부착 상태 평가에 유도초음파 기법을 효과적으로 적용하기 위한 해석적인 연구로써, epoxy 층의 두께와 물성 변화가 유도초음파 모드의 전파 특성에 미치는 영향을 분석하고자 한다. 특히, 여러 유도초음파 모드 중에서 비파괴검사 시에 많이 사용되는 기본 모드인 A0, S0 모드의 전파 특성을 분석하여 FRP 보강판 부착 상태 평가에 효과적인 기본 모드와 가진 주파수 대역을 알아보고자 한다.

## 2. 모델링 및 해석 방법

### 2.1. 모델링

FRP 보강판이 부착된 콘크리트에서의 유도초음파 모드 전파 특성 해석에서 epoxy 층을 포함하기 위하여, Fig. 1과 같이 유도초음파 전파 시스템을 FRP-epoxy-concrete로 구성된 다층 시스템으로 모델링 하였으며, 해석 모델에서 사용된 재료의 물성은 Table 1에 정리하였다. 일반적으로 FRP는 이방성을 가지고 있으며 FRP ply의 적층 방식에 따라 각 방향별 물성이 달라질 수 있지만, 적층 FRP 판의 경우 FRP ply의 적층 수와 배열각의 변화가 증가하면 등방성 판의 거동에 근접하게 된다[8]. FRP 보강판 부착 공법에서 사용하는 FRP 판은 일반적으로 콘크리트 바닥판과 같이 2방향 휨을 받는 경우에도 사용할 수 있도록 ply를 다양한 배열각으로 두껍게 적층하여 등방성의 성질을 갖도록 제작하는 경우가 많다. 따라서 본 연구에서는 FRP 판의 재질을 등방성 재료로 고려하였다. 해석 모델에서 FRP 보강판은

Table 1 Material properties

Materials	$\rho(kg/m^3)$	$\nu$	$E(GPa)$
FRP	1600	0.38	165
epoxy	1650	0.39	11.2
Concrete	2300	0.2	25



Fig. 1 FRP-epoxy-concrete model

콘크리트 바닥판에 대한 보강판 부착 공법 시에 많이 사용되는 SIKA®사의 적층 CFRP 판인 CarboDur®를 이용하였으며 판 두께는 1.6 mm 이다 [9]. 한편, 콘크리트 층은 콘크리트 바닥판으로 고려하여 바닥판의 일반적인 두께인 250 mm 를 사용하였으며, 콘크리트의 물성은 보통 강도 콘크리트의 물성을 사용하였다. 마지막으로, FRP 보강판 부착 공법에서 epoxy 층은 통상 0.1 mm 에서 0.3 mm 정도의 두께로 도포하는 것이 적당하다고 알려져 있으며[1], 이는 FRP 두께에 비하여 1/5~1/15 정도로 상당히 두꺼운 층일 뿐만 아니라, 실제 시공 과정에서 정확하게 도포 두께를 조절하기가 어렵기 때문에 본 연구에서는 이를 변수로써 고려하였다.

## 2.2. 해석 방법

유도초음파의 전파 특성인 분산 곡선을 구하기 위하여 다층 시스템 모드 해석법인 전역행렬법을 이용하였다. 전역행렬법에서는 다층 시스템의 각 층에서의 파동장(wavefield) 변위( $u$ )와 응력( $\sigma$ )을 부분파(partial wave) 행렬 방정식으로 다음 식과 같이 먼저 구성한다.

$$\begin{Bmatrix} u \\ \sigma \end{Bmatrix} = [D]\{A\} \quad (1)$$

여기에서  $[D]$ 는 층행렬이고,  $\{A\}$ 는 부분파 벡터이다. 각 층마다 구성된 부분파 행렬 방정식은 이후 각 계면에서의 경계조건이 만족되도록 조합하여 전체 시스템에 대한 하나의 행렬방정식인 전역행렬 방정식으로 다음 식과 같이 구성한다.

$$[G]\{A\} = 0 \quad (2)$$

여기에서  $[G]$ 는 다층시스템에 대한 전역행렬이고, 전역행렬의 열은 각 층의 부분파의 크기에 대응하는 값이며, 각 층의 재료 및 기하학적 특성 등이 반영되어 있다[10]. 전역행렬의 각 항들은 재료 감쇠를 고려하지 않을 경우 주파수 (frequency;  $\omega$ ), 파수 (wave number;  $k$ )의 함수로 나타난다. 한편, 식 (2)를 만족하는 유용해를 구하기 위해서는 다음과 같이 전역행렬의 행렬식 (determinant) 값이 “0”이 되어야 한다.

$$f(\omega, k) = \det[M] = 0 \quad (3)$$

따라서 식(3)을 만족하는 주파수와 파수를 반복 계산에 의해 찾으면, 이로부터 시스템 상에 존재하는 모든 모드에 대하여 전파 특성인 속도와 감쇠 분산 곡선을 구할 수 있게 된다. 본 연구에서는 기본 유도초음파 모드의 분산 곡선을 구하기 위한 전역행렬식의 해를 상용 프로그램인 DISPERSE®를 이용하여 구하였다[11].

한편, 다층시스템에서 유도초음파의 감쇠는 사용 재료에 따른 재료감쇠(material damping)에 의한 요인과 경계조건에 따른 투과 손실 (transmission loss or leakage loss)에 의한 감쇠 요인으로 나뉘어서 생각할 수 있다. 특히 투과 손실은 경계조건의 변화에 따라서 손실 정도(즉, 감쇠 정도)가 달라지는 특성이 있다. 본 연구는 경계층인 epoxy층의 변화에 대한 유도초음파의 전파 특성을 알아보는 것에 목적이 있으므로, 이에 따라 투과 손실에 의한 감쇠만을 순수하게 분석하기 위해서 재료감쇠는 고려하지 않았다. 투과 손실에 따른 감쇠는 식(3)의 복소수 파수 해를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\kappa = 2\pi \frac{k_{im}}{k_{re}} \quad (4)$$

여기에서,  $\kappa$ 는 단위 파장당 감쇠의 크기이며 따라서 단위 크기의 파동성분이 단위 파장을 전파할 경우  $e^{-\kappa}$ 의 크기로 감쇠된다는 것을 의미한다. 또한,  $k_{re}$ 와  $k_{im}$ 는 각각 복소수 파수 해의 실수성분과 허수 성분이다[11].

3 해석 결과 및 토의

3.1. Epoxy 두께 변화에 따른 특성

Epoxy의 두께가 유도초음파 기본 모드의 전파 특성에 미치는 영향을 알아보기 위하여, epoxy의 두께를 0 mm, 0.1 mm, 0.2 mm, 0.3 mm로 바꾸어서 해석을 수행하였다. 여기에서 epoxy 두께 0 mm는 epoxy를 고려하지 않은 경우와의 비교를 위하여 포함하였다.

Fig. 2는 다양한 epoxy 두께에 대한 A0모드의 위상속도 분산 곡선이다. A0모드의 경우 위상속도는 epoxy두께 변화와 상관없이 일정한 위상속도를 가지는 것을 알 수 있다. Fig. 3은 다양한 epoxy두께에 대한 A0 모드의 감쇠 분산 곡선이다. A0모드는 주파수가 증가함에 따라 감쇠의 크기는 점진적으로 증가하지만 위상 속도 분산과 마찬가지로 epoxy 두께의 변화는 A0 모드의 감쇠에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 따라서 어느 주파수 대역을 사용하더라도 A0 모드를 보강판 부착 불량 탐지에 이용할 경우 epoxy 층의 두께에 대한 영향은 없을 것으로 예상할 수 있으며, 마찬가지로 A0 모드의 거동 해

석과정에서는 epoxy 층에 대한 고려를 하지 않더라도 해석 결과에 미치는 영향이 매우 작은 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 A0 모드의 경우 epoxy 층이나 concrete 층보다는 FRP 층으로 대부분의 에너지가 전파되기 때문으로 판단된다. Fig. 4는 100 kHz에서의 A0 모드에 대한 변형에너지밀도(strain energy density) 분포를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이, epoxy 층의 두께 변화와 관계없이 에너지 분포가 매우 일정하며, 또한 대부분의 파동에너지가 FRP 층에서 전파되는 것을 확인할 수 있다. 이로부터, A0 모드의 경우 파동에너지가 FRP 층으로 대부분 전파되고 부착 계면 층인 epoxy 층이 A0 모드의 거동에 거의 영향을 미치지 않기 때문에, 부착 불량 구간 탐지에 A0 모드를 이용할 경우, 탐지 민감도가 낮아 효과적이지 않을 것으로 판단할 수 있다.

한편, S0 모드의 경우 A0 모드와는 다른 양상이 나타난다. Fig. 5는 S0 모드의 위상 속도 분산 곡선이다. S0 모드는 약 110 kHz 부근에서 콘크리트의 전단파 속도인 약 2130 m/s의 값으로 수렴하지만, 이 보다 낮은 주파수 대역에서는, epoxy 층의 두께에 따라 서로 다른 위상 속도를 가진다. 특히, 약 20 kHz 부근에서 가장 낮은 위

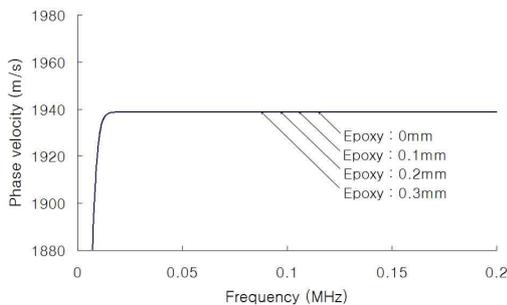


Fig. 2 Phase velocity of A0 mode for various epoxy thickness

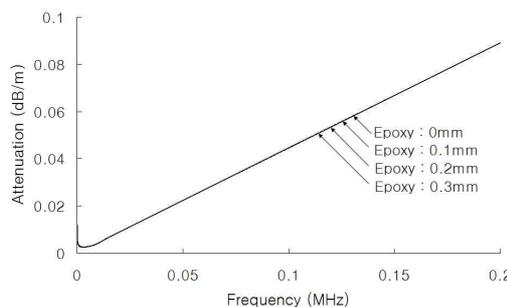


Fig. 3 Attenuation of A0 mode for various epoxy thickness

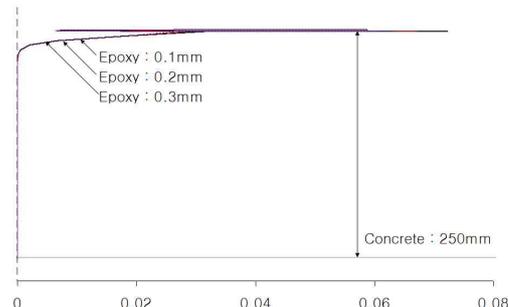


Fig. 4 Strain energy density distribution of A0 mode at 100 kHz

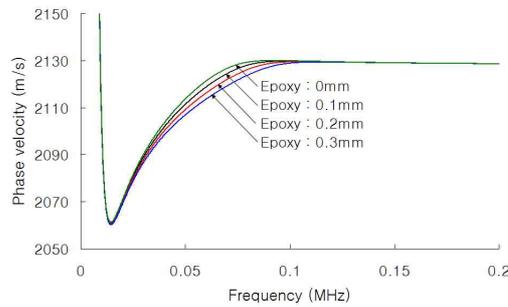


Fig. 5 Phase velocity of S0 mode for various epoxy thickness

상 속도값을 나타내고, 이보다 주파수가 증가할 때 위상속도도 증가하지만, epoxy의 두께가 두꺼울수록 완만하게 증가하는 것을 알 수 있다. Fig. 6은 S0 모드의 감쇠 분산 곡선이다. 위상 속도 분산 곡선에서와 마찬가지로 epoxy 두께에 따라서 감쇠 분산이 다르게 나타나며, 주파수 대역에 따라 서로 다른 감쇠가 다른 것을 알 수 있다. 특히, S0 모드의 위상 속도가 일정한 속도로 수렴하는 주파수 이상의 주파수 대역에서는 epoxy의 두께와 관계없이 투과 감쇠가 거의 발생하지 않지만, 이보다 낮은 주파수 대역에서는 epoxy의 두께가 두꺼울수록 투과 감쇠가 상대적으로 크게 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이는 투과 감쇠가 발생하는 주파수 대역에서는 S0 모드의 거동이 epoxy 층과 콘크리트 층의 영향을 크게 받기 때문으로 판단된다. Fig. 7은 100 kHz에서의 S0 모드에 대한 변형에너지밀도 분포를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이, epoxy 층의 두께에 따라 FRP 층과 콘크리트 층에서의 변형에너지 분포가 매우 다른 양상을 보이며, 특히 Fig. 5에서 나타난 A0 모드의 변형에너지 분포에 비하여 Fig. 7에 나타난 S0 모드의 경우 콘크리트 층에서 매우 큰 에너지를 가질 뿐만 아니라 epoxy 층의 두께에 따라서 콘크리트 층에서의 에너지 분포도 달라지는 것을 확인할 수 있다. 뿐만 아니라 Fig. 8에서 나타난 바와 같이 epoxy 층의 두께가 두꺼울수록 epoxy 층에서의 에너지 크기가 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 이는 감쇠주파수 대역에서 epoxy 층의 두께가 두꺼울수록 감쇠가 더욱 커진다는 사실을 입증한다. 이러한 결과로부터, S0 모드의 거동에서는 부착 계면 층인 epoxy 층의 영향이 A0 모드에 비하여 매우 크며, 따라서 부착 불량과 같이 부착 계면 층의 변화가 발생할 경우 A0 모드 보다는 S0 모드를 사용할 때 변화에 대한 민감도가 높아 탐지에 더욱 효과적일 것으로 예상할 수 있다. 그러나 S0 모드가 콘크리트의 전단파 속도로 수렴하는 주파수 대역에서는 부착계면의 효과가 S0 모드에 미치는 영향이 거의 없으므로, 이러한 주파수 대역보다는 낮은 대역의 주파수를 사용하여야 한다. 뿐만 아니라, 유도초음파의 거동해석에서도 S0 모드를 대상으로 할 경우, epoxy 층에 대한 고려가 반드시 필요하다는 것을 알 수 있다.

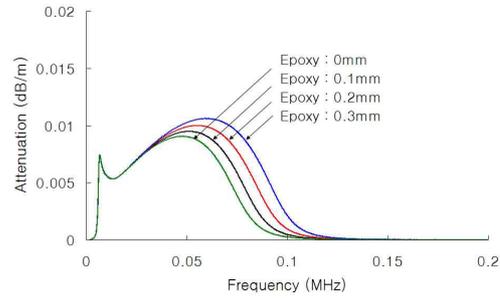


Fig. 6 Attenuation of S0 mode for various epoxy thickness

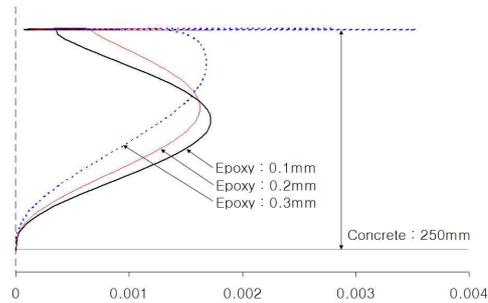


Fig. 7 Strain energy density distribution of S0 mode at 100 kHz

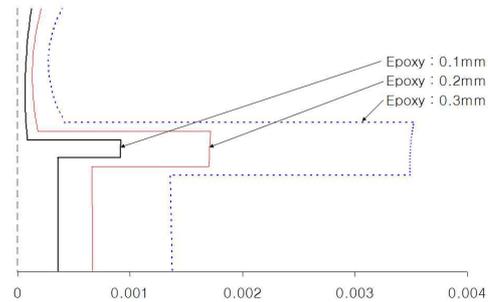


Fig. 8 Enlarged strain energy density distribution of S0 mode at 100 kHz (focused on epoxy layer)

### 3.2. Epoxy의 물성 변화에 따른 특성

접착제인 epoxy의 강도와 강성과 같은 물성은 경화시간과 온도 상태에 따라서 매우 다른 양상이 나타날 뿐만 아니라, 보강판 부착 시공 시에 사용하는 epoxy는 경화제의 종류와 배합비에 따라서도 epoxy의 물성이 매우 다르게 나타난다 [12]. 따라서, FRP 보강판 부착 시공 시에 epoxy의 도포 두께를 일정하게 유지하고 또한 보강판의 부착이 양호한 구간이라고 할지라도, 구간 내

에 epoxy의 물성이 상이한 구간이 존재할 수 있다. 특히, epoxy의 강성이 상이한 구간에서는 응력 집중이 발생할 수 있으며, 결과적으로 보강판 부착 성능 저하의 원인이 되기도 한다[13,14]. 따라서, 보강판 부착 공법의 보강 성능 평가 시에는 부착 불량 구간의 탐지 외에도 물성 변화 구간을 탐지할 필요가 있다. 본 연구에서는 epoxy의 물성 중 강성이 유도초음파 기본 모드의 전파에 미치는 영향을 분석하여, epoxy의 강성 변화 구간 탐지에 유효한 주파수 대역을 선정하고자 하였다. 이를 위하여 epoxy의 탄성계수를 변수로 하여 해석을 수행하였으며, 해석 과정에서 epoxy의 물성 변화에 의한 영향만을 순수하게 보기 위하여 epoxy의 두께는 0.2 mm로 고정하였고, FRP 판의 두께와 콘크리트의 두께도 마찬가지로 각각 1.6 mm와 250 mm로 고정하였다. Epoxy의 탄성계수는 기준 탄성계수인 11.2 GPa에서 각각 44%(6.3 GPa), 65%(3.94 GPa) 감소된 경우로 고려하여 해석을 수행하였다. 마지막으로, 앞에서 A0 모드가 epoxy 층의 존재에 영향을 받지 않는 것으로 나타났기 때문에, A0 모드는 해석에서 제외하고 S0 모드만을 분석하였다.

Fig. 9과 Fig. 10은 각각 S0 모드의 위상 속도와 감쇠 분산 곡선을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이, 특정 주파수 대역에서 위상 속도와 감쇠가 epoxy의 탄성계수 변화에 따라 다른 값을 가지며, 탄성계수가 낮을수록 위상 속도는 작아지지만 감쇠는 증가하는 것을 확인할 수 있다. 특히, 위상 속도 분산 곡선에서 일정한 위상 속도로 수렴하는 주파수의 위치가 epoxy의 탄성계수가 작을수록 더욱 고주파 대역으로 이동하는 것을 확인할 수 있으며, 마찬가지로 S0 모드의 투과 감쇠가 없어지는 주파수 대역도 epoxy의 탄성계수가 작을수록 고주파 대역으로 이동하는 것을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 동일한 두께의 epoxy 층을 가진 경우라도 탄성계수와 같은 물성의 변화가 S0 모드의 전파 특성에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있으며, 따라서 S0 모드는 부착 불량 구간뿐만 아니라 epoxy의 강도와 같은 물성 변화 구간의 탐지에도 효과적인 것으로 판단할 수 있다. 특히, 부착 불량 구간 탐지에서와 마찬가지로 감쇠가 발생하는 주파수 대역에서 탄성계수 변화에 가장 민감하므로, 이 부근의 주파수 대역을 이용하는 것이 epoxy 물성 변화를 탐지하

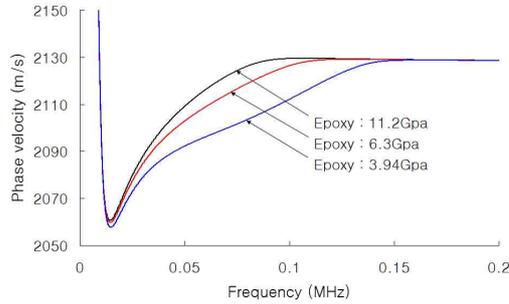


Fig. 9 Phase velocity of S0 mode for various elastic modulus of epoxy

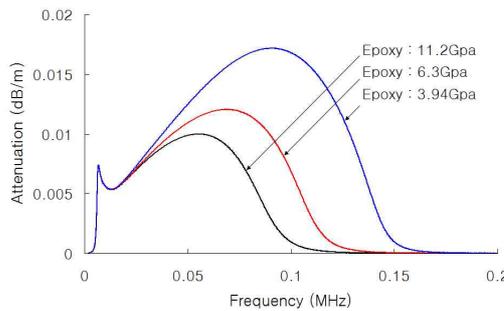


Fig. 10 Attenuation of S0 mode for various elastic modulus of epoxy

는 것에 효과적일 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 FRP 보강판 부착 콘크리트에서 유도초음파 기본 모드의 전파 특성에 접착제인 epoxy의 층 두께와 물성이 미치는 영향을 알아보고자 하였으며, 이를 위해 FRP-epoxy-concrete로 구성된 다층 유도초음파 시스템에 대한 모드 해석을 수행하였다. 모드 해석으로부터 구한 속도 분산 곡선과 감쇠 분산 곡선을 바탕으로 기본 모드인 A0 모드와 S0 모드의 거동에 epoxy 두께와 물성이 미치는 영향을 분석하였고, 이로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) A0 모드의 경우 epoxy 층의 두께가 미치는 영향이 거의 없으나, S0 모드는 거동 특성에 epoxy 층의 두께가 미치는 영향이 매우 크며, 따라서 FRP 보강판 부착 콘크리트에서의 유도초음파 거동 해석 과정에서 epoxy 층에 대한 고려가 필요하다.
- (2) S0 모드의 경우 부착 계면층인 epoxy 층의

두께 변화와 같은 계면 상태 변화에 A0 모드에 비해 큰 영향을 받으므로, 부착 불량 구간 탐지 등과 같은 부착 상태 평가 시에 A0 모드 보다 민감도가 높을 것으로 판단된다.

- (3) Epoxy층의 탄성계수가 변화될 경우, 마찬가지로 S0 모드의 거동에 큰 영향을 미치며, 이로부터 부착 강도와 같은 epoxy 물성의 변화를 탐지하고자 할 경우에도 S0 모드가 유효할 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 부경대학교 학술연구지원사업 (과제 번호 PK-2011-65)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

#### 참고문헌

- [1] J. G. Teng, J. F. Chen, S. T. Smith and L. Lam, "FRP-strengthened RC structures," John Wiley & Sons Inc., USA (2002)
- [2] O. Büyüköztürk and T. Yu "Understanding and assessment of debonding failures in FRP-concrete systems," *Proceedings of 7th International Congress on Advances in Civil Engineering*, Istanbul, Turkey (2006)
- [3] B. Akuthota, D. Hughes, R. Zoughi, J. Myers and A. Nanni "Near-field microwave detection of disbond in carbon fiber reinforced polymer composites used for strengthening cement-based structures and disbond repair verification," *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 16, No 6, pp. 540-546 (2004)
- [4] M. Ekenel, V. Stephen, J. J. Myers and R. Zoughi, "Microwave NDE of RC beams strengthened with CFRP laminates containing surface defects and tested under cyclic loading," *Proceedings of 16<sup>th</sup> World Conference on Nondestructive Testing*, Montreal, Canada (2004)
- [5] M. Castaings, B. Hosten and D. Francois, "The sensitivity of surface guided modes to the bond quality between a concrete block and a composite plate," *Ultrasonics*, Vol. 42, pp. 1067-1071 (2004)
- [6] K. Luangvilai, W. Purunai and L. Jacobs, "Guided Lamb wave propagation in composite plate/concrete component," *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 128 No. 12, pp. 1337-1341 (2002)
- [7] S. Kim, C. In, K. Cronin, H. Sohn and K. Harries, "Reference-free NDT technique for debonding detection in CFRP-strengthened RC structures," *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 133, No. 8, pp. 1080-1092 (2007)
- [8] B. D. Agarwal, L. J. Broutman and K. Chandrashekara, "Analysis and Performance of Fiber Composites," John Wiley & Sons Inc., USA (2006)
- [9] SIKA<sup>®</sup> CarboDur<sup>®</sup> Product Data Sheet, <http://www.sika.com.au/>
- [10] M. J. S. Lowe, "Matrix technique for modeling ultrasonic waves in multilayered media," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, Vol. 42(4), pp. 525-542 (1995)
- [11] B. Pavlakovic and M. J. S. Lowe, "DISPERSE: A System for Generating Dispersion Curves (User Manual)," Department of Mechanical Engineering, Imperial College, University of London (2003)
- [12] B. Reeve, "Effect of adhesive stiffness and CFRP geometry on the behavior of externally bonded CFRP retrofit measures subject to monotonic loads," MS thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Pittsburgh (2005)
- [13] 양동석, 홍성남, 박선규, "탄소섬유판으로 부착 보강된 철근콘크리트 부재의 계면 부착 거동", *대한토목학회 논문집*, 27권 3A호, pp. 443-452 (2007)
- [14] A. Zorn "Effect of adhesive stiffness and CFRP geometry on the behavior of externally bonded CFRP retrofit measures subject to fatigue loads," MS thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Pittsburgh, PA, USA (2006)